

УДК 539.1.06

©1994

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ АННИГИЛЯЦИИ ПОЗИТРОНОВ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛАХ

Ю.А.Новиков, А.В.Раков, В.П.Шантарович

Методом измерения угловых распределений аннигиляционных фотонов (УРАФ) измерены угловые распределения поликристаллических меди, алюминия, тантала и хрома. Определены параметры параболической и гауссовой компонент УРАФ этих металлов. Обнаружена эмпирическая закономерность, связывающая I_p (интегральный вклад параболической компоненты) и θ_p (импульс Ферми электронов в металле в единицах ms): $\theta_p^6/I_p = aK$, где $K = 2, 3, 5$ и 6 для меди, алюминия, тантала и хрома соответственно. Определена величина безразмерного параметра $a = (3.74 \pm 0.05) \cdot 10^{-14}$.

Аннигиляции позитронов в поликристаллических металлах посвящено большое количество работ (см., например, [1-3]). Широкие исследования выявили основные закономерности аннигиляции и позволили перейти к исследованиям структуры металлов и ее изменениям под действием различных факторов [4-6]. Однако в последнее время появились работы, указывающие на то, что, по-видимому, не все закономерности аннигиляции позитронов в поликристаллических металлах известны [7-9]. Настоящая работа посвящена анализу результатов экспериментов, сообщенных в [8,9], по измерению угловых распределений аннигиляционных фотонов (УРАФ) в меди, алюминии, тантале и хrome.

Угловые распределения измерялись на установке [10], реализующей стандартную параллельно-щелевую геометрию эксперимента [3]. Отличие установки [10] от традиционных заключается в том, что в процессе эксперимента измеряются не только совпадения γ -квантов, но и загрузкии обоих детекторов γ -квантов. Как показали эксперименты, это позволяет вводить поправки в угловые распределения, устраняющие искажения УРАФ, возникающие за счет поглощения γ -квантов в исследуемом образце [10]. Источником позитронов служил изотоп ^{22}Na активностью 10 mCi . Набранная статистика составила $(5-10) \cdot 10^3$ в максимуме УРАФ.

Образцы металлов имели размеры $15 \times 30 \text{ mm}$ и толщину 2 mm (тантал толщиной 0.1 mm) и были вырезаны из большого куска металла (тантал — лист холоднокатанного металла). Никакой специальной обработки поверхности образцов или их отжига не проводилось.

Угловые распределения поликристаллических меди, алюминия, тантала и хрома показаны на рис. 1. Там же приведены их разложения

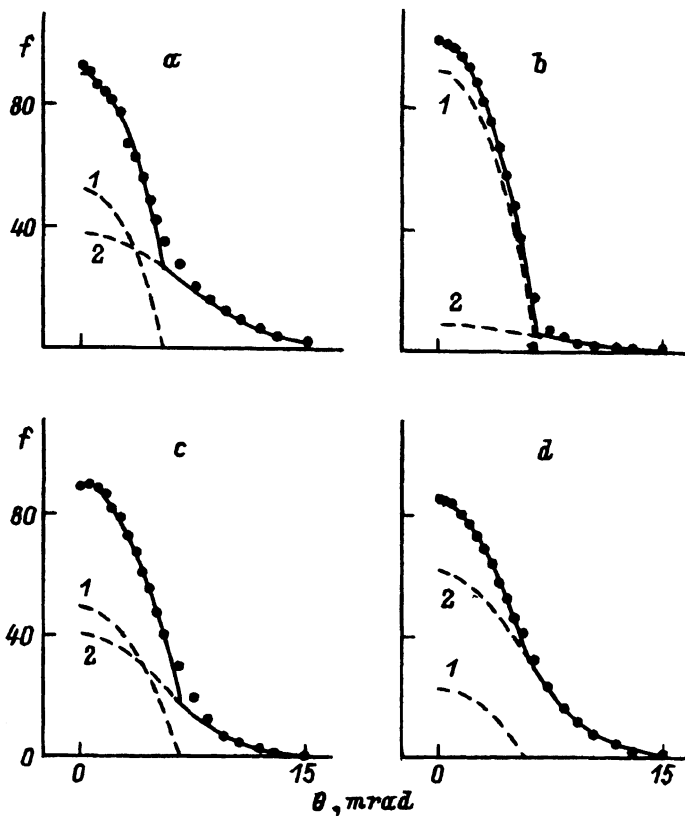


Рис. 1. Угловые распределения аннигиляционных фотонов поликристаллических меди (а), алюминия (b), тантала (с) и хрома (d).

Штриховые линии — параболическая (1) и гауссовская (2) компоненты УРАФ. Сплошная линия соответствует сумме компонент.

на параболическую $f_p(\theta)$ и гауссовскую $f_g(\theta)$ компоненты

$$f(\theta) = f_p(\theta) + f_g(\theta), \quad (1)$$

$$f_p(\theta) = \begin{cases} (3I_p/4\theta_p^3) (\theta_p^2 - \theta^2), & |\theta| \leq \theta_p, \\ 0, & |\theta| > \theta_p, \end{cases}$$

$$I_p = \int_{-\theta_p}^{+\theta_p} f_p(\theta) d\theta,$$

$$f_g(\theta) = \left(I_g / \sqrt{2\pi}\theta_g \right) \exp(-\theta^2 / 2\theta_g^2);$$

$$I_g = \int_{-\infty}^{+\infty} f_g(\theta) d\theta,$$

Параметры параболической и гауссовской компонент УРАФ поликристаллических меди, алюминия, тантала и хрома

	Парабола		Гауссиан	
	$I_p, \%$	θ_p, mrad^1	$I_g, \%$	θ_g, mrad
Cu	38.4 ± 0.9	5.566 ± 0.025	59 ± 5	6.31 ± 0.16
Al	85.1 ± 0.6	6.738 ± 0.015	14.9 ± 2.4	6.4 ± 0.4
Ta	45.8 ± 1.3	6.705 ± 0.027	54 ± 7	5.13 ± 0.17
Cr	17.8 ± 0.7	5.91 ± 0.04	82 ± 10	5.25 ± 0.16

$$I_p + I_g = 1$$

(параметры компонент представлены в табл. 1). Видно, что сумма параболической и гауссовой кривых хорошо описывает эксперимент, как это и следует из других экспериментов [1-3].

Согласно общепринятой трактовке [1-3], разделение УРАФ на параболическую и гауссовскую компоненты связано с наличием двух типов электронов в металлах — свободных (электронов проводимости) и связанных (электронов, входящих в состав остовов атомов металла). Параболическая компонента определяется аннигиляцией позитронов на электронах проводимости, а гауссовская — на внутренних электронах атомов. В этой связи импульсная плотность электронов проводимости определяется выражением

$$n_c(p) = \frac{A_c}{\theta} \frac{df_p(\theta)}{d\theta}, \quad (2)$$

где A_c — нормировочная константа, а угол θ_p связан с импульсом Ферми p_F с помощью выражения

$$p_F = \theta_p mc,$$

m — эффективная масса электрона, c — скорость света.

Таким образом, в экспериментах по измерению УРАФ можно определить импульс Ферми электронов в данном металле и тем самым число свободных электронов, приходящихся на 1 атом металла, согласно формуле

$$Z_c = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{mc}{h} \right)^3 \frac{A}{\rho N_A} \theta_p^3, \quad (3)$$

Таблица 2

Параметры меди, алюминия, тантала и хрома, необходимые для расчета Z_c , и величины Z_c и K , полученные из выражений (3) и (5) соответственно

	A	$\rho, \text{g/cm}^3$	Z_c	K
Cu	63.55	8.89	1.20 ± 0.02	2.06 ± 0.08
Al	27	2.7	2.98 ± 0.02	2.94 ± 0.06
Ta	180.95	16.6	3.20 ± 0.04	5.3 ± 0.2
Cr	52	7.2	1.45 ± 0.03	6.4 ± 0.4

где N_A — число Авогадро, A — атомный вес, ρ — плотность металла.

В табл. 2 представлены параметры меди, алюминия, тантала, хрома и величины Z_c , полученные из выражения (3) (параметры θ_p взяты из табл. 1). По своей сущности Z_c должны быть целыми числами, различными для разных металлов. Однако из табл. 2 видно, что значения Z_c не являются целыми числами. Обычно это объясняют дефектностью образца.

Нами обнаружена эмпирическая закономерность, заключающаяся в том, что величина θ_p^6/I_p , созданная из параболы θ_p и I_p исследованных металлов, описывается следующим выражением:

$$\theta_p^6/I_p = aK + b, \quad (4)$$

где K — целое число ($K = 1, 2, 3 \dots$), свое для каждого металла; a и b — параметры, не зависящие от вида металла. Методом наименьших квадратов были определены a и b по данным из табл. 1

$$a = (3.91 \pm 0.21) \cdot 10^{-14}, \quad b = (-0.5 \pm 0.6) \cdot 10^{-14}.$$

В пределах ошибки $b = 0$ и эмпирическую закономерность можно представить в виде

$$\theta_p^6/I_p = aK. \quad (5)$$

Она приведена на рис. 2. Величина параметра a , определенная из выражения (5) для рассмотренных металлов, показана на рис. 3. Ее среднее значение, полученное по методу наименьших квадратов

$$a = (3.74 \pm 0.05) \cdot 10^{-14},$$

изображено сплошной линией, а штриховой линией ограничен интервал ошибок. Используя эту величину и экспериментальные значения θ_p^6/I_p , получим значения K для меди, алюминия, тантала и хрома (табл. 2). В пределах ошибок значениями K являются целые числа, чего не скажешь о Z_c .

Необходимо отметить, что величины K совпадают с номером группы периодической системы элементов каждого металла (за исключением меди), который определяет число электронов на внешней оболочке

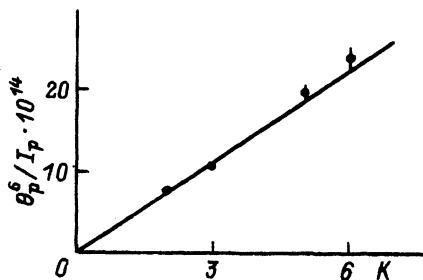


Рис. 2. θ_p^6/I_p как функция K . Сплошная линия соответствует зависимости (5).

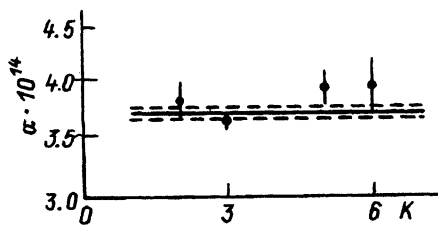


Рис. 3. Величина параметра a при разных K . Сплошная линия соответствует среднему значению, а штриховые линии ограничивают интервал ошибок.

атома. Эти электроны участвуют в образовании химической связи и электронного газа в металле. По-видимому, величина θ_p^6/I_p , а не выражение (3) определяет удельное число электронов в электронном газе в металле, приходящихся на 1 атом металла. В связи с тем что медь может иметь валентность 1 и 2, значение $K(\text{Cu})=2$ не противоречит общему выводу о том, что величина θ_p^6/I_p характеризует удельное число свободных электронов в электронном газе.

В настоящее время физическая природа закономерности (5) не ясна. Необходимо проверить ее на других металлах и на металлах, подвергнутых разным способам обработки.

Список литературы

- [1] Stewart A.T. // Can. J. Phys. 1957. V. 35. N 2. P. 168-183.
- [2] West R.N. // Adv. Phys. 1973. V. 22. N 3. P. 263-383.
- [3] Positrons in Solids / Ed. P.Hautojarvi. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 255 p.
- [4] Berko S., Mader J. // Appl. Phys. 1974. V. 5. N 4. P. 287-306.
- [5] Михаленков В.С. // Металлофизика. 1983. Т. 5. № 6. С. 44-60.
- [6] Шалаев А.М., Адаменко А.А. Радиационно-стимулированное изменение электронной структуры. М.: Атомиздат, 1977. 176 с.
- [7] Novikov Yu.A., Rakov A.V., Shantarovich V.P. // Phys. St. Sol. 1990. V. A121. N 2. P. 495-500.
- [8] Novikov Yu.A., Rakov A.V., Shantarovich V.P. // 22 Polish Seminar on Positron Annihilation. May 14-18, 1990. Piechowice. Abstract of Papers. Wroclaw, 1990. P. 24.
- [9] Novikov Yu.A., Rakov A.V., Shantarovich V.P. // Preprint N 37. Institute of General Physics Academy of Sciences of the USSR. 1991. 11 p.
- [10] Новиков Ю.А., Филимонов М.К., Шантарович В.П. // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 3. С. 43-46.

Институт общей физики РАН
Москва

Поступило в Редакцию
5 января 1994 г.